

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ТОНКАЯ МЕТАЛИНЗА С ВЫСОКОЙ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ

В.В. Котляр^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}, С.С. Стафеев^{1,2}, Лим О'Фаолейн³, М.В. Котляр²

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

³ Школа физики и астрономии, Университет Сент-Эндрюса, Великобритания

Аннотация

Изготовлена и исследована тонкая металлинза в плёнке аморфного кремния диаметром 30 мкм с фокусным расстоянием, равным длине волны 633 нм, с периодом субволновой структуры 220 нм и глубиной рельефа 110 нм. Линза одновременно управляет поляризацией и фазой падающего на неё лазерного света. Она преобразует линейную поляризацию в радиальную и осуществляет острую фокусировку света. Такая металлинза была изготовлена по технологии электронной литографии и ионного травления. Фокусное пятно, сформированное такой линзой, при освещении её Гауссовым пучком с линейной поляризацией имело размеры по декартовым осям и по полуспаду интенсивности, равные 0,49 и 0,55 длины волны. Это фокусное пятно меньше всех других фокусных пятен, полученных с помощью металлинз. Экспериментальные результаты согласуются с результатами моделирования: размеры фокусного пятна 0,46 и 0,52 мкм соответственно.

Ключевые слова: бинарная оптика, метаповерхность, поляризация, фокусировка, ближнепольная микроскопия.

Цитирование: Котляр, В.В. Тонкая металлинза с высокой числовой апертурой / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, С.С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 5-12. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-5-12.

Введение

В последние годы в оптике изучаются плоские бинарные компоненты микрооптики толщиной меньше длины волны, состоящие из набора субволновых элементов (столбиков, щелей, отрезков, решеток) из металла или полупроводника, которые одновременно могут менять поляризацию, амплитуду и фазу падающего лазерного излучения. Такие компоненты фотоники называются компонентами с метаповерхностью (КМП). Обзор по ним можно найти в [1]. С помощью КМП можно сформировать оптические вихри [2]; пилообразные решетки, отражающие 80% света в заданный угол в широком диапазоне в ближней ИК-области спектра [3]; сфокусировать свет в кольцо [4] или в поперечный отрезок [5]. Особенно интересным является применение КМП в качестве супертонких микролинз [6–12]. Причем линзы в [6–10,12] были реализованы для ИК-диапазона, и только линза в [11] фокусировала свет видимого диапазона с длиной волны 550 нм. Линзы на основе металлических наноантенн [6, 9, 10] имеют меньшую эффективность, чем линзы из аморфного кремния [7, 8, 11, 12]. Наилучшими характеристиками обладает металлинза из кремниевых столбиков диаметром 200 нм и высотой около 1 мкм [7]. С помощью такой линзы получено минимальное круглое фокусное пятно с диаметром 0,57λ с эффективностью около 40%. Поляризация падающего света линейная. Недостатками линзы из [7] является высокое аспектное отношение (5:1), которое требуется обеспечить для качественного изготовления кремниевых столбиков.

Наиболее близкой металлинзой к рассматриваемой в данной работе является металлинза из работы [11]. В [11] была изготовлена бинарная микролинза в плёнке

аморфного кремния с фокусным расстоянием 100 мкм (числовая апертура $NA=0,43$) для длины волны 550 нм. Падающий на линзу лазерный свет с правой круговой поляризацией преобразовывался в пучок с левой круговой поляризацией и фокусировался в круглое фокусное пятно с диаметром 670 нм. В [11] линза рассчитывалась на основе фазы Панхратнама–Берри и работает только при падении на неё света с круговой поляризацией. Это является недостатком метода, так как для формирования круговой поляризации нужен дополнительный элемент – четвертьволновая пластинка. Кроме того, у металлинзы из [11] невысокая числовая апертура.

В данной работе предложен другой метод расчёта бинарных супертонких металлинз для субволновой фокусировки линейно поляризованного лазерного света в круглое пятно с диаметром меньше дифракционного предела. Метод заключается в том, что в каждой кольцевой зоне бинарной зонной пластинки Френеля помещаются бинарные субволновые дифракционные решетки (достаточно четырех), преобразующие линейную поляризацию падающего света в радиальную. Предложенным методом рассчитана, а затем изготовлена и исследована тонкая металлинза в плёнке аморфного кремния диаметром 30 мкм с фокусным расстоянием, равным длине волны 633 нм, с периодом субволновой структуры 220 нм и глубиной рельефа 110 нм. Линза одновременно управляет поляризацией и фазой падающего на неё лазерного света. Она преобразует линейную поляризацию в радиальную и осуществляет острую фокусировку света. Такая металлинза была изготовлена по технологии электронной литографии и ионного травления.

1. Расчёт и моделирование металлинзы

В этом параграфе для удобства читателя кратко повторим этапы расчёта и моделирования металлинзы из [12]. Известно [13, 14], что острая фокусировка лазерного света с линейной поляризацией с помощью компонент микрооптики (бинарного аксикона [13] или бинарной зонной пластинки [14]) приводит к формированию эллиптического субволнового фокусного пятна. Например, если бинарную зонную пластинку (ЗП) из стекла (показатель преломления $n=1,5$) с фокусным расстоянием ($f=200$ нм), меньшим длины волны ($\lambda=532$ нм) и глубиной рельефа ($h=0,9$ мкм) осветить Гауссовым лазерным пучком с линейной поляризацией и радиусом перетяжки $w=4\lambda$, то за пластинкой на расстоянии $z=200$ нм сформируется эллиптическое (в виде «гантели») фокусное пятно, вытянутое вдоль направления поляризации. Размеры этого фокусного пятна по полуспаду интенсивности, рассчитанные с помощью FDTD-метода и программы Fullwave, равны $\text{FWHM}_x=0,85\lambda$ и $\text{FWHM}_y=0,37\lambda$ (эллиптичность 2,3:1) [12].

Известно также, что, преобразовав лазерный пучок с линейной поляризацией в пучок с радиальной поляризацией, можно получить круглое фокусное субволновое пятно [15]. Например, в [16] рассчитан 4-зонный микрополяризатор из субволновых решеток в плёнке золота, который преобразует падающий на его поверхность лазерный свет с линейной поляризацией в радиально поляризованный свет. Оказывается, четырех зон достаточно, чтобы сформировать световое поле с почти радиальной поляризацией [15, 16] и получить с помощью такого светового поля острую субволновую фокусировку света [15, 17]. Заметим, что 4-зонный пропускающий микрополяризатор может быть реализован в плёнке аморфного кремния на прозрачной подложке [18]. При этом период решеток был равен $T=230$ нм и глубина рельефа $h=130$ нм ($\lambda=633$ нм). При расчёте показатель преломления кремния выбирался равным $n=3,87-i0,016$.

Однако фокусировка света с помощью двух разных элементов (отражающего или пропускающего преобразователя поляризации и зонной пластинки) приводит к необходимости высокоточной юстировки оптической схемы и потерям энергии при отражении от дополнительных поверхностей. Поэтому актуальным является расчёт компонента микрооптики, который бы одновременно и преобразовывал поляризацию лазерного света, и осуществлял острую фокусировку. Такой бинарный субволновый оптический элемент можно создать, объединяя вместе два уже рассмотренных элемента. На рис. 1 показана картина бинарного рельефа металлинзы, которая объединяет в себе свойства и микрополяризатора, и зонной пластинки с высокой числовой апертурой. При построении этого элемента использовалось два одинаковых поляризатора, повернутых относительно друг друга на π , и ЗП. В зонах, соответствующих тем кольцам ЗП, где фаза прошедшего поля не должна меняться, размещались дифракционные решетки из первого поляризатора. В тех зонах, которые должны осуществ-

лять поворот фазы на π , размещалось содержимое второго поляризатора. Таким образом, в соседних зонах ЗП осуществлялось преобразование поляризации в радиальную с чередующейся через π фазой.

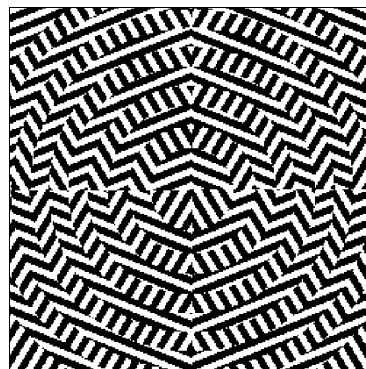


Рис. 1. Схема штрихов пропускающей бинарной металлинзы, одновременно преобразующей линейную поляризацию в радиальную и фокусирующей свет

Параметры металлинзы, показанной на рис. 1, следующие: длина волны $\lambda=633$ нм, фокусное расстояние $f=633$ нм ($\text{NA}=1$), высота рельефа $h=0,24$ мкм, размер отсчета 22 нм, период решеток 220 нм, канавка у дифракционной решетки 110 нм, и ступенька – шириной 110 нм. Уточнённый (измеренный на эллипсометре) показатель преломления аморфного кремния $n=4,35+i0,486$; подложка из стекла ($n=1,5$). Расчетная эффективность прохождения света через метаповерхность – 29 %.

2. Изготовление металлинзы и измерение рельефа поверхности

Металлинза с рельефом, показанным на рис. 1, была изготовлена по технологии электронной литографии. На плёнку аморфного кремния (130 нм) (a-Si), напылённую на прозрачную пирексную подложку (показатель преломления 1,47), был нанесен слой 320 нм резиста ПММА, который был закреплён при температуре 180 °С. Величина толщины резиста (320 нм) была подобрана оптимальным образом. Во избежание формирования заряда на поверхности образца, на него было распылено 15 нм золота. Электронным лучом с напряжением 30 кВ бинарный шаблон (рис. 1) был перенесен на поверхность резиста. Для проявления образца использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. При этом процессе слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА.

Трансформирование шаблона с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов CHF_3 и SF_6 . Толщина резиста была подобрана таким образом, чтобы он смог защитить части рельефа во время травления 130 нм аморфного кремния. Аспектное отношение скоростей травления материала и маски было найдено 1:2,5. На рис. 2 показано изображение образца металлинзы, полученное с помощью электронного микроскопа. На рис. 2а показана вся металлинза диаметром 30 мкм, а на рис. 2б показана её увеличенная центральная часть.

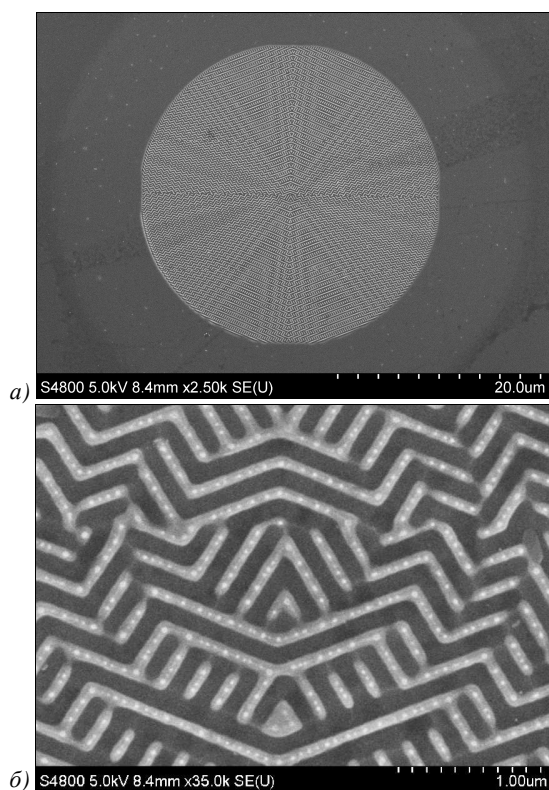


Рис. 2. Изображение в электронном микроскопе металлинзы в плёнке аморфного кремния диаметром 30 мкм (а) и её увеличенный центральный фрагмент 3×2 мкм (б)

Также рельеф металлинзы был измерен на атомно-силовом микроскопе. На рис. 3а показан фрагмент центральной части рельефа металлинзы, а на рис. 3б показан характерный профиль рельефа металлинзы. Глубина рельефа имеет разброс в диапазоне от 80 нм до 160 нм со средним значением 120 нм. Радиус заострения кантилевера микроскопа 10 нм. Ошибка определения глубины рельефа не превышает 5 %, а ошибка определения поперечных координат – 2,5 %.

3. Моделирование металлинзы с учетом технологических погрешностей изготовления

Для того, чтобы учесть в моделировании технологические ошибки при изготовлении металлинзы, измеренный на атомно-силовом микроскопе рельеф (рис. 3) был перенесен в программу Fullwave для дальнейшего моделирования. На рис. 4а показан кадр рельефа из программы, который получен из рельефа на рис. 3а. Параметры моделирования следующие: размер металлинзы (рис. 4а) – 6,22×6,22 мкм или 256×256 отсчетов; максимальный перепад высот рельефа – 189 нм; длина волны $\lambda = 633$ нм, падающая волна плоская и линейно поляризованная; сетка отсчетов $\lambda/30$ по всем трем координатам; показатель преломления аморфного кремния $n = 4,35 + 0,486i$, показатель преломления прозрачной подложки $n = 1,5$.

На рис. 4б показано рассчитанное распределение интенсивности на расстоянии $z = 600$ нм от металлинзы. Размеры фокусного пятна по полуспаду интенсивности равны $\text{FWHM}_x = 0,521\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,457\lambda$ (вдоль направления поляризации).

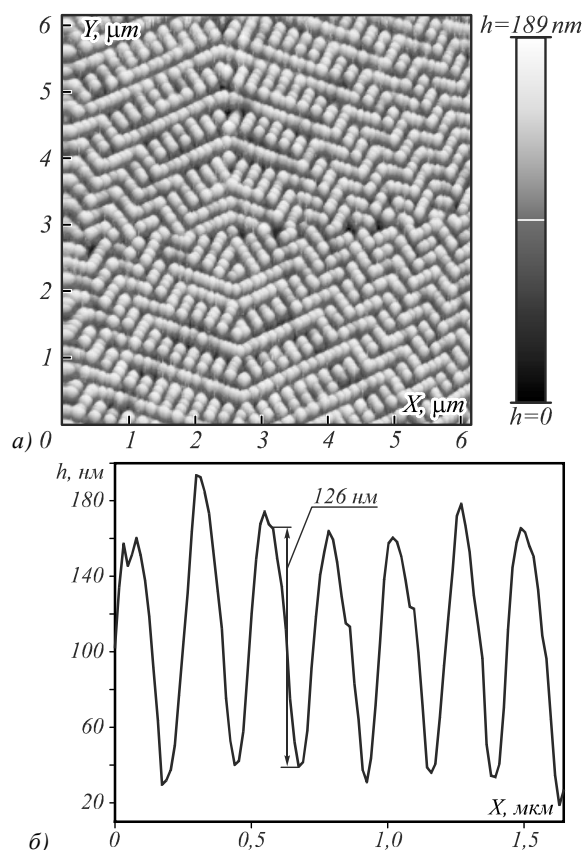


Рис. 3. Центральный фрагмент рельефа металлинзы, измеренный на атомно-силовом микроскопе Solver Pro (а) и сечение на некотором участке рельефа металлинзы (б)

На расстоянии $z = 600$ нм интенсивность в фокусе максимальна и в 2 раза превосходит интенсивность падающего света, хотя диаметр фокусного пятна оставался почти постоянным на расстоянии от $z = 200$ нм до $z = 900$ нм. На рис. 4в приведены сечения вдоль оси X интенсивности электрического поля вдоль осей X и Y. Несимметричность сечений относительно центра обусловлена погрешностями в изготовлении элемента.

При сканировании микрорельефа с помощью атомно-силового микроскопа сложно расположить элемент так, чтобы центр элемента точно совпал с центром отсканированного изображения. Это послужило причиной того, что центр фокусного пятна на рис. 4б не совпадает с центром отсканированной области.

4. Эксперимент по фокусировке лазерного света металлинзой

Экспериментальное исследование фокусировки света исследуемой металлинзой осуществлялось средствами сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ). Оптическая схема проводимого эксперимента указана на рис. 5.

В эксперименте свет от гелий-неонового лазера (длина волны 633 нм, мощность 50 мВт) попадал через волоконно-оптическую транспортную систему на исследуемую металлинзу и фокусировался в субволновое пятно. Полная ширина пучка, падающего на металлинзу, составляла 30 мкм. Распределение интенсивности в фокусе исследовалось с помощью полого

металлизированного пирамидального кантилевера C с отверстием при вершине 100 нм.

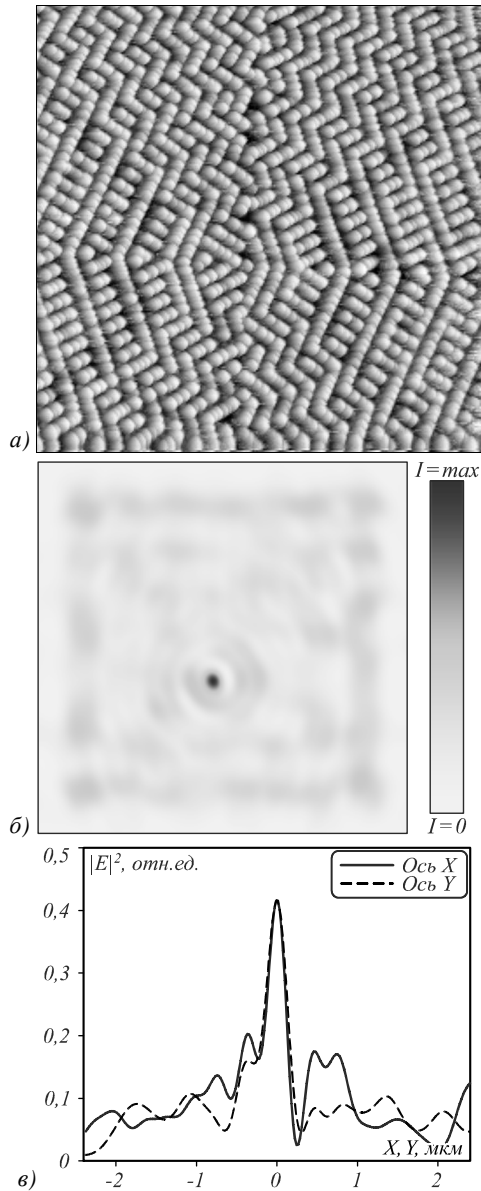


Рис. 4. Полутоновой рельеф (а): черный цвет – высота 0, а белый цвет – высота 189 нм, точно соответствующей кадру рельефа на рис. За для металлизации, но перенесенный в программу Fullwave для моделирования. Результат расчёта распределения интенсивности (б) в фокусе металлизации, полученный с помощью рельефа (а). Размер кадра (б) равен 6×6 мкм. Сечения вдоль осей X, Y через центр фокусного пятна, отображённые для интенсивности $|E|^2$ (в)

Свет, прошедший через отверстие в кантилевере, улавливался 100-кратным объективом O_1 , после чего попадал через спектрометр S (Solar III, Nanofinder 30) на CCD-камеру (Andor, DV401-BV).

Экспериментально измеренное фокусное расстояние линзы было равно $z = 0,6$ мкм. На рис. 6 показано распределение интенсивности в фокусе, зафиксированное на СБОМ. На рис. 7 показаны сечения интенсивности фокусного пятна (рис. 6) вдоль осей x и y . Максимальная интенсивность в фокусе в 11 раз пре-

вышла максимальную интенсивность падающего на линзу пучка.

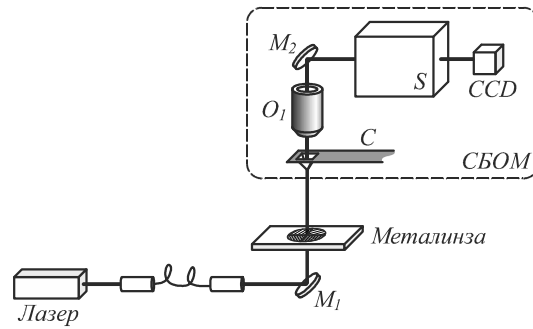


Рис. 5. Оптическая схема эксперимента. M_1, M_2 – зеркала, O_1 – 100× объектив, C – кантилевер, S – спектрометр, CCD – камера

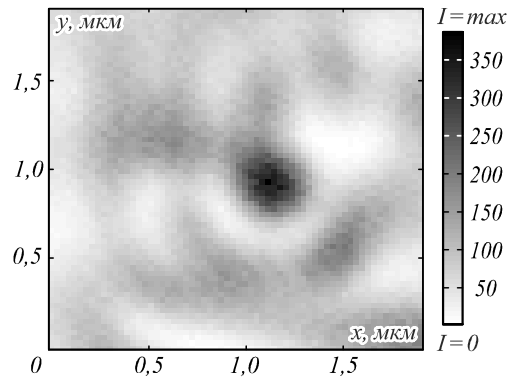


Рис. 6. Распределение интенсивности на расстоянии $z = 0,6$ мкм от металлизации

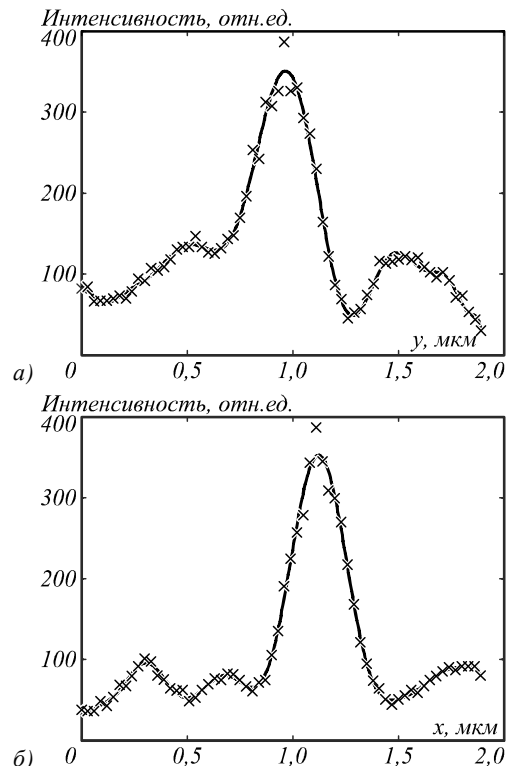


Рис. 7. Измеренные сечения распределения интенсивности в фокусном пятне (рис. 6).

Крестики – экспериментальные значения, кривая – их аппроксимация полиномом

Экспериментально измеренные значения ширины пятна были равны $\text{FWHM}_x = 0,55\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,49\lambda$. Эти значения отличаются всего на 8 % от расчётных значений ($\text{FWHM}_x = 0,521\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,457\lambda$), полученных с учетом технологических погрешностей изготовления металлинзы, и на 15 % от размеров фокусного пятна для идеальной металлинзы ($\text{FWHM}_x = 0,434\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,432\lambda$), у которой нет разбросов высоты рельефа и высота рельефа равна 70 нм.

Заключение

В предыдущей работе авторов [12] был предложен новый подход к формированию рельефа бинарной субволновой микролинзы в тонкой плёнке аморфного кремния. Кольца зонной пластинки Френеля с заданным фокусным расстоянием и диаметром заполняются бинарными субволновыми решетками, каждая из которых поворачивает электрический вектор нормально падающего на неё линейно поляризованного лазерного света на заданный угол.

Период, глубина рельефа решетки и фактор заполнения подбираются оптимальным образом из условия примерного равенства амплитуды света, прошедшего через каждую локальную решетку. Это можно обеспечить только для небольшого числа углов поворота вектора поляризации. В данной статье для преобразования линейной поляризации в радиальную используются только четыре разные дифракционные решетки, поворачивающие вектор поляризации падающего света на четыре угла, обеспечивающие формирование круглого фокусного пятна. Фазовый сдвиг на π между соседними зонами линзы обеспечивается тем, что две локальные решетки, примыкающие к границе зон, должны поворачивать вектор поляризации на углы, разность которых равна π .

В данной работе описанная выше металлинза была изготовлена по технологии электронной литографии и ионного травления. Фокусное пятно, сформированное такой линзой, при освещении её Гауссовым пучком с линейной поляризацией имело размеры по декартовым осям и по полуспаду интенсивности, равные 0,49 и 0,55 длины волны. Экспериментальные результаты согласуются с результатами моделирования: размеры фокусного пятна 0,46 и 0,52 соответственно.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-9498.2016.9), а также грантов РФФИ 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, 15-47-02492, 16-29-11698.

Литература

1. **Yu, N.** Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // *Nature Materials*. – 2014. – Vol. 13. – P. 139-150. – DOI: 10.1038/nmat3839.
2. **Yang, Y.** Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation / Y. Yang, W. Wang, P. Moitra, I.I. Kravchenko, D.P. Briggs // *Nano Letters*. – 2014. – Vol. 14(3). – P. 1394-1399. – DOI: 10.1021/nl4044482.
3. **Sun, S.** High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces / S. Sun, K.-Y. Yang, C.-M. Wang, T.-K. Juan, W.T. Chen, C.Y. Liao, Q. He, S. Xiao, W.-T. Kung, G.-Y. Guo, L. Zhou, D.P. Tsai // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12(12). – P. 6223-6229. – DOI: 10.1021/nl3032668.
4. **Lan, L.** Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens / L. Lan, W. Jiang, Y. Ma // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 102(23). – P. 231119. – DOI: 10.1063/1.4810004.
5. **Verslegers, L.** Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film / L. Verslegers, P.B. Catrysse, Z. Yu, J.S. White, E.S. Barnard, M.L. Brongersma, S. Fan // *Nano Letters*. – 2009. – Vol. 9(1). – P. 235-238. – DOI: 10.1021/nl802830y.
6. **Aieta, F.** Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces / F. Aieta, P. Genevet, M.A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro, F. Capasso // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12(9). – P. 4932-4936. – DOI: 10.1021/nl302516v.
7. **Arbabi, A.** Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays / A. Arbabi, Y. Horie, A.J. Ball, M. Bagheri, A. Faraon // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – P. 7069. – DOI: 10.1038/ncomms8069.
8. **Arbabi, A.** Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission / A. Arbabi, Y. Horie, M. Barheri, A. Faraon // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 10(11). – P. 937-943. – DOI: 10.1038/NANO.2015.186.
9. **Ni, X.** Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses / X. Ni, S. Ishii, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // *Light: Science & Applications*. – 2013. – Vol. 2(4). – e72. – DOI: 10.1038/lsa.2013.28.
10. **West, P.R.** All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens / P.R. West, J.L. Steward, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev, V.V. Shkunov, F. Strohkendl, Yu.A. Zakharenkov, R.K. Dodds, R. Byren // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(21). – P. 26212-26221. – DOI: 10.1364/OE.22.026212.
11. **Lin, D.** Dielectric gradient metasurface optical elements / D. Lin, P. Fan, E. Hasman, M.L. Brongersma // *Science*. – 2014. – Vol. 345(6194). – P. 298-302. – DOI: 10.1126/science.1253213.
12. **Котляр, В.В.** Моделирование поляризационной микролинзы, фокусирующей свет с линейной поляризацией в почти круглое субволновое пятно / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 451-457. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-451-457.
13. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52(3) – P. 330-339. – DOI: 10.1364/AO.52.000330.
14. **Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // *Journal of Modern Optics*. – 2013. – Vol. 60(13). – P. 1050-1059. – DOI: 10.1080/09500340.2013.831136.
15. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beams / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91. – P. 233901. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
16. **Налимов, А.Г.** Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн,

- С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 229-236.
17. **Stafeev, S.S.** Tight focus of light using micropolarizer and microlens / S.S. Stafeev, L. O'Faolain, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54(14). – P. 4388-4394. – DOI: 10.1364/AO.54.004388.
18. **Стафеев, С.С.** Четырёхзонный пропускающий азимутальный микрополяризатор с фазовым сдвигом / С.С. Стафеев, М.В. Котляр, Л. О'Фаолейн, А.Г. Налимов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 12-18. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-12-18.

Сведения об авторах

Котляр Виктор Викторович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств. E-mail: kotlyar@smr.ru.

Налимов Антон Геннадьевич, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 100 работ и 3 патентов. E-mail: anton@smr.ru.

Стафеев Сергей Сергеевич, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

О'Фаолейн Лиам (Уильям Веллан-Куртин) из Ирландии. В 2000 году окончил физический факультет Университета города Корк. С 2001 года начал работать в группе микрофотоники Школы физики и астрономии Университета города Сэнт-Эндрюс (Шотландия) как аспирант по созданию полупроводниковых лазеров. В 2005 году защитил диссертацию и получил степень доктора философии. Область научных интересов: электронная литография для создания фотонных кристаллов. В настоящее время он является координатором европейской платформы по наноструктурированию ePIXnet. Соавтор 53 научных статей с высоким индексом цитирования. E-mail: jww1@st-andrews.ac.uk.

Котляр Мария Викторовна, 1979 года рождения, доктор философии, научный сотрудник лаборатории НИЛ-35 Самарского университета (СГАУ). В 2001 году окончила физический факультет Самарского государственного университета, в 2005 году защитила диссертацию в университете Сент-Эндрюса (Великобритания). Область научных интересов: нанофотоника. В Scopus 25 публикаций. E-mail: ichteos@km.ru.

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 30 декабря 2016 г. Окончательный вариант – 31 января 2017 г.

THIN METALENS WITH HIGH NUMERICAL APERTURE

V.V. Kotlyar^{1,2}, A.G. Nalimov^{1,2}, S.S. Stafeev^{1,2}, L.O'Faolain³, M.V. Kotlyar²

¹ Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

² Samara National Research University, Samara, Russia,

³ SUPA, School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews, Scotland

Abstract

We designed, numerically simulated, fabricated and characterized a thin metalens in an amorphous silicon film. The lens has a diameter of 30 μm , a 633-nm focal length equal to the incident wavelength, a 220-nm period of the subwavelength features, and a 110-nm relief depth. The lens simultaneously controls the phase and polarization of the incident laser light, transforming linear polarization into the radial one and generating a sharp focus. The metalens was fabricated using electron lithography and reactive ion etching. The focal spot obtained from an incident linearly po-

larized Gaussian beam of wavelength λ measured 0.49λ and 0.55λ on the x - and y -axes. This is a record-breaking focal spot ever obtained using metalenses. Experimental results agree well with the numerically simulated focal spot size of 0.46λ and 0.52λ .

Keywords: binary optics, meta surface, polarization, focus, near field microscopy.

Citation: Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar MV. Thin metalens with high numerical aperture. *Computer Optics* 2017; 41 (1): 5-12. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-5-12.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, Presidential grants for support of leading scientific schools (NSH-9498.2016.9) and Russian Foundation of Basic Research Grants, (grants No. 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, 15-47-02492, 16-29-11698).

References

- [1] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014; 13: 139-150. DOI: 10.1038/nmat3839.
- [2] Yang Y, Wang W, Moitra P, Kravchenko II, Briggs DP. Dielectric meta-reflectary for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation. *Nano Lett* 2014; 14(3): 1394-1399. DOI: 10.1021/nl4044482.
- [3] Sun S, Yang K-Y, Wang C-M, Juan T-K, Chen WT, Liao CY, He Q, Xiao S, Kung W-T, Guo G-Y, Zhou L, Tsai DP. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces. *Nano Lett* 2012; 12(12): 6223-6229. DOI: 10.1021/nl3032668.
- [4] Lun L, Jiang W, Ma Y. Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens. *Appl Phys Lett* 2013; 102(23): 231119.
- [5] Verslegers L, Catrysse PB, Yu Z, White JS, Barnard ES, Brongersma ML, Fan S. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film. *Nano Lett* 2009; 9(1): 235-238. DOI: 10.1021/nl802830y.
- [6] Aieta F, Genevet P, Kats MA, Yu N, Blanchard R, Gaburro Z, Capasso F. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces. *Nano Lett* 2012; 12(9): 4932-4936. DOI: 10.1021/nl302516v.
- [7] Arbabi A, Horie Y, Ball AJ, Bagheri M, Faraon A. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays. *Nat Commun* 2015; 6: 7069. DOI: 10.1038/ncomms8069.
- [8] Arbabi A, Horie Y, Barheri M, Faraon A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nat Nanotech* 2015; 10(11): 937-943. DOI: 10.1038/NNANO.2015.186.
- [9] Ni X, Ishii S, Kildishev AV, Shalaev VM. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light Sci Appl* 2013; 2(4): e72. DOI: 10.1038/lsa.2013.28.
- [10] West PR, Steward JL, Kildishev AV, Shalaev VM, Shkunov VV, Strohkendl F, Zakharenkov YA, Dodds RK, Byren R. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens. *Opt Express* 2014; 22(21): 26212-26221. DOI: 10.1364/OE.22.026212.
- [11] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma ML. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science* 2014; 345(6194): 298-302. DOI: 10.1126/science.1253213.
- [12] Kotlyar VV, Nalimov AG, Kotlyar MV. Modeling a polarization microlens to focus linearly polarized light into a near-circular subwavelength focal spot. *Computer optics* 2016; 40(4): 451-457. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-451-457.
- [13] Kotlyar VV, Stafeev SS, Liu Y, O'Faolain L, Kovalev AA. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light. *Applied Optics* 2013; 52(3): 330-339. DOI: 10.1364/AO.52.000330.
- [14] Stafeev SS, Kotlyar VV, O'Faolain L. Subwavelength focusing of laser light by microoptics. *J Mod Opt* 2013; 60(13): 1050-1059. DOI: 10.1080/09500340.2013.831136.
- [15] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beams. *Physical Review Letters* 2003; 91: 233901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
- [16] Nalimov AG, O'Faolain L, Stafeev SS, Shanina MI, Kotlyar VV. Reflected four-zones subwavelength microoptics element for polarization conversion from linear to radial. *Computer optics* 2014; 38(2): 229-236.
- [17] Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar VV, Nalimov AG. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Applied Optics* 2015; 54(14): 4388-4394. DOI: 10.1364/AO.54.004388.
- [18] Stafeev SS, Kotlyar MV, O'Faolain L, Nalimov AG, Kotlyar VV. A four-zone transmission azimuthal micropolarizer with phase shift. *Computer optics* 2016; 40(1): 12-18. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-12-18.

Authors' information

Victor Victorovich Kotlyar is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in physics and mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: kotlyar@smr.ru.

Anton Gennadyevich Nalimov (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 "Mathematical modeling and program complexes", finished it in 2006 with speciality 01.04.05 "Optics". A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Samara, Russia. Candidate in physics and mathematics, co-author of 100 papers and 3 inventions. E-mail: anton@smr.ru.

Sergey Sergeevich Stafeev (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD-method, near-field optics. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com . ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Liam O'Faolain (William Whelan-Curtin) is from the Republic of Ireland and studied for a degree in Physics at University College Cork. He joined the Microphonic Research Group of School of Physics and Astronomy of SU-PA, School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews (Scotland) in October 2001 to begin a PhD on Modelocked Semiconductor Lasers. He received the PhD degree in Physics in 2005. His other interests are electron beam lithography for photonic crystals. He also keeps records of the groups Fabrication Processes. He is now working as a PostDoc coordinating the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and coauthor of 53 scientific papers with high citation index. E-mail: jww1@st-andrews.ac.uk .

Maria V. Kotlyar, born in 1979, Ph.D., a researcher at the Research laboratory 35 at Samara University. In 2001 she graduated from Physic department of Samara State University, in 2005 defended her thesis at the University of St. Andrews (UK). Research interests: nanophotonics. In the *Scopus* she has 25 publications. E-mail: ichteos@km.ru .

Received December 30, 2016. The final version – January 31, 2017.
